УДК 661.879+621.365+621.314

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОКСИДОВ УРАНА

В.Н. Брендаков, Ю.Н. Дементьев*, С.Н. Кладиев, В.П. Пищулин

Северская государственная технологическая академия
E-mail: kladiev@ssti.ru
*Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Предложено использование симисторных станций управления для плавного регулирования тока через нагревательные элементы греющей камеры барабанной вращающей печи при получении оксидов урана. Представлена функциональная схема системы автоматического управления электронагревательными элементами, с помощью которой возможно осуществить оптимальное управление температурным режимом печи. Приведена имитационная модель и некоторые результаты исследования.

1. Введение

В настоящее время одним из основных промышленных методов производства оксидов урана, являющихся важнейшими промежуточными соединениями при переработке природного урана, отработанного ядерного горючего и оружейного урана в ядерное топливо энергетических реакторов, во фториды урана и в металлический уран, служит метод химической денитрации уранилнитрата через полиуранаты аммония. В этой связи, исследование процесса термического разложения полиуранатов аммония имеет важное теоретическое и практическое значение [1–3]. Процесс термического разложения тетраураната аммония до оксидов урана производится в барабанной вращающейся печи (БВП).

БВП представляет собой цилиндр диаметром 0,6 м и длиной 8,8 м, размещенный в греющей камере с трехзонным косвенным электрическим обогревом. Печь имеет наклон к горизонту в 2° и постоянную угловую частоту вращения 3,33 об/мин. Степень заполнения барабана печи – 3,0...3,5 %. Время реагирования составляет около 120 мин. В аппарате при температуре 723...923 K происходит необратимая эндотермическая реакция термического разложения тетраураната аммония:

$$9(NH_4)_2U_4O_{13} \rightarrow 12U_3O_8 + 10NH_3 + 21H_2O + 4N_2.$$

В печь подается предварительно нагретый азот, расход которого составляет от 6 до 20 м^3/ч.

Для качественного ведения технологического процесса необходимо регулировать температурный режим в греющей камере по длине печи. Греющая камера с электрическим обогревом предназначена для создания необходимой температуры внутри барабана печи. Стенки камеры выложены из шамотного и диатомитового кирпича. Кирпичная кладка с внешней стороны защищена металлическим каркасом и облицована керамической плиткой. Сверху греющая камера закрыта теплоизолирующими блоками. По электрической схеме включения греющая камера разделена на три независимые зоны обогрева. Внутри камеры для ее обогрева имеются нагревательные элементы (НЭ). В качестве НЭ применяются нихромовые спирали, соединенные в звезду. Таких звезд на первой и второй зонах по три, а на третьей зоне две. Температуры в зонах обогрева контролируются термопарами ТХК.

Схема подключения нагревательных элементов к питающей сети представлена на рис. 1.

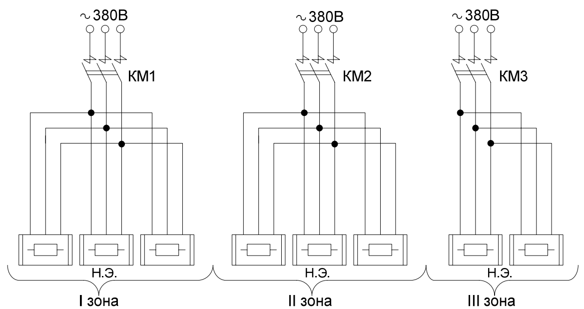


Рис. 1. *Схема подключения нагревательных элементов*

Традиционно управление НЭ греющих камер БВП осуществляется с помощью релейно-контакторных схем. Релейно-контакторное управление не обеспечивает высокой надежности работы НЭ, т. к. подача напряжения на непрогретый НЭ приводит к его перегоранию из-за мощности, выделяющейся на НЭ в момент включения на полное напряжение в несколько раз превышающей номинальную. Кроме того, мгновенное выделение значительной тепловой энергии в малом объеме способствует возникновению термонапряжений в конструкционных элементах [4]. Большие значения токов (до 150 А) коммутируемой цепи приводят также к резкому сокращению рабочего ресурса контакторов.

При этом, существующая релейно-контакторная система автоматического контроля и регулирования температуры в зонах греющей камеры печи не позволяет стабильно поддерживать оптимальные значения температур, определяемые регламентом технологического процесса, без дополнительных затрат электроэнергии, повышенного износа НЭ и силовых контактов коммутирующих питающие цепи НЭ.

Применение контакторов не позволяет также поддерживать значение температуры с высокой точностью, т. к. способ регулирования предполагает отключение контактора при достижении верх-

ней границы заданной температуры и его включение при достижении нижней. Частота коммутаций цепи питания НЭ ограничивается предельной частотой коммутации контактора.

Перечисленные недостатки могут быть устранены путем перехода от релейных контакторов, коммутирующих цепи питания, к силовым полупроводниковым ключам, реализация которых возможна путем использования тиристоров или симисторов. Применение полупроводниковых ключей для управления дает возможность создать систему автоматического регулирования температуры греющей камеры БВП, оптимизировать процесс получения оксидов урана и обеспечить повышение производительности, надежности и энергоэффективности всего технологического процесса в целом.

В данной работе предлагается вместо контакторов использовать разработанные авторами станции управления (СУ) на симисторах, с помощью которых плавно регулируется ток через НЭ греющей камеры барабанной вращающей печи при получении оксидов урана. На рис. 2 представлена схема замены контактора (КМ) на блок силовых симисторов (БСС).

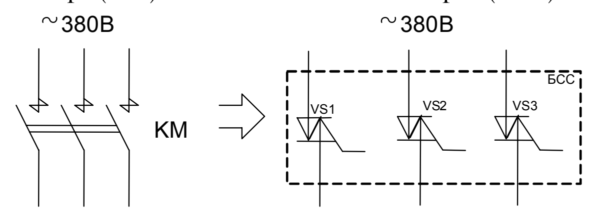


Рис. 2. *Схема замены контакторов (КМ), коммутирующих цепи питания НЭ на блок силовых симисторов (БСС)*

Управление температурным режимом БВП. На рис. 3 изображена блок схема системы управления НЭ греющей камеры БВП. НЭ равномерно распределены вдоль оси БВП в греющих камерах и соединены по схеме звезда с нулем.

Данная схема управления нагревом БВП позволяет регулировать температуру рабочих зон греющей камеры вдоль оси печи с требуемой точностью до 5 %, которая определяется в основном точностью датчика температуры (термопары) и количеством зон греющей камеры.

В системе управления температурным режимом печи использованы специализированные блоки управления и регулирования производственного объединения «ОВЕН» (г. Москва). Блок управления коммутацией силовых симисторов (БУСС), в соответствии с сигналами управления, формируемыми регулятором температуры, выдает импульсы управления коммутацией силовых симисторов. Блок служит для преобразования сигналов управления 0...20 мА в сигналы управления симисторами. При помощи БУСС осуществляется плавный выход НЭ на заданный уровень мощности. В блоке предусмотрена блокировка входного сигнала. Блок позволяет производить контроль тока в нагрузке и переход напряжения через ноль. Устройство контроля тока в нагрузке обеспечивает защитное отключение нагрузки при превышении установленной величины [5]. Блок позволяет управлять трехфазной нагрузкой двумя методами:

- фазовым;
- по числу полупериодов.

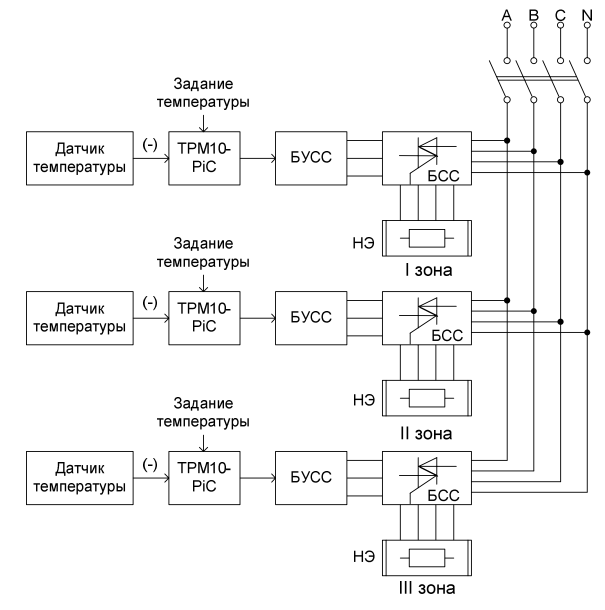


Рис. 3. *Блок схема системы управления температурой БВП*

Метод фазового управления позволяет в широких пределах изменять угол открытия симистора и обеспечивает плавное регулирование мощности в нагрузке. При этом момент подачи управляющего сигнала определяет фазу открытия симистора. Однако при работе симисторов с углами управления отличными от нуля возникает большой уровень высших гармоник. Особенно этот уровень велик при активной нагрузке. Наибольшую опасность эти гармоники представляют для автоматических измерительных устройств переменного тока.

Метод управления по числу полупериодов обеспечивает более высокую точность управления мощностью в нагрузке при минимальном уровне высокочастотных помех. При этом управляющий сигнал определяет число пропускаемых в нагрузку целых полупериодов напряжения, и коммутация симисторов происходит в момент перехода напряжения через ноль, когда ток в нагрузке близок к нулевому значению. Данный способ управления выбран в качестве основного и успешно применен в станциях управления на симисторах, разработанных авторами для регулирования температуры греющей камеры БВП.

В качестве регулятора температуры в системе управления температурным режимом БВП используется микропроцессорный программируемый измеритель-регулятор, который имеет вход для подключения первичных преобразователей (датчиков), блок обработки данных, состоящий из измерителя физических величин, цифрового фильтра, пропорционально-интегрально-дифференциального регу-

лятора и устройства сравнения, связанные с соответствующими выходными устройствами.

Измеритель-регулятор совместно с входным датчиком температуры служит для контроля и управления технологическим процессом нагрева и с высокой точностью поддерживает заданную температуру. Он имеет несколько модификаций входов, позволяющих подключить:

- термопреобразователи сопротивления;
- термопары;
- датчики тока или напряжения.

В замкнутых системах автоматического регулирования температуры управляющее воздействие (суммарная мощность нагревательных элементов) зависит от величины и знака выходного сигнала регулятора температуры и определяет значение вводимой мощности в греющую камеру печи, необходимую для устранения возникшего в системе рассогласования. В предлагаемой системе автоматического управления температурой изменение подводимой к греющей камере печи мощности осуществляется путем изменения напряжения питания нагревательных элементов с помощью симисторных станций управления (СУ). Мощность, выделяющаяся в нагревательных элементах греющей камеры печи, является нелинейной функцией подводимого напряжения и определяется выражением [6]:

$$P_{ГК} = \frac{(U_У K_{СУ})^2}{R_{НЭ}}, \qquad (1)$$

где $R_{НЭ}$ – эквивалентное сопротивление нагревательных элементов; $U_У$, $K_{СУ}$ – входной сигнал управления и коэффициент усиления симисторной станции управления.

Очевидно, что для обеспечения линейной зависимости между выходным сигналом регулятора температуры $U_{РТ}$ и мощностью $P_{ГК}$, подводимой к греющей камере печи, СУ имеет на входе нелинейный блок со следующей функцией преобразования:

$$U_У = \mathrm{sign}(\Delta\theta) U_{РТ} \sqrt{K_{СУ}}, \qquad (2)$$

где $\mathrm{sign}(\Delta\theta)$ – сигнал рассогласования на входе регулятора температуры.

Из выражений (1) и (2) следует, что при наличии такого блока обеспечивается линейная зависимость мощности, подводимой к греющей камере печи от входного сигнала регулятора температуры:

$$P_{ГК} = \frac{U_{РТ}^2 K_{СУ}^3}{R_{НЭ}}. \qquad (3)$$

С учетом выражения (3) передаточную функцию разомкнутого контура регулирования температуры в греющей камере печи в одноконтурной системе непрерывного действия с эквивалентной передаточной функцией, например, одноемкостного звена [6]

$$W_{ГК}(p) = \frac{K_{ГК}}{T_{ГК} p + 1},$$

можно представить в виде:

$$W_{РАЗ.}(p) = \frac{K_{СУ}^3}{R_{НЭ}} \cdot \frac{K_{ГК}}{T_{ГК} p + 1} \cdot \frac{K_{ДТ}}{T_{ДТ} p + 1},$$

где $K_{ГК}$, $T_{ГК}$ – коэффициент передачи и эквивалентная постоянная времени греющей камеры печи; $K_{ДТ}$, $T_{ДТ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика температуры.

Если принять $T_{ДТ}$ в качестве малой некомпенсируемой постоянной времени, то при настройке контура регулирования температуры на модульный оптимум получим передаточную функцию регулятора температуры:

$$W_{РТ}(p) = K_{РТ} \frac{T_{РТ} p + 1}{T_{РТ} p}, \qquad (4)$$

где $K_{РТ}$, $T_{РТ}$ – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора температуры. Здесь

$$K_{РТ} = \frac{R_{НЭ} T_{РТ}}{a_{РТ} T_{ДТ} K_{СУ}^3 K_{ГК} K_{ДТ}}, \quad T_{РТ} = T_{ГК},$$

где $a_{РТ}$ – параметр настройки регулятора температуры.

Экспериментальные исследования и структурное моделирование в пакете MATLAB программы SIMULINK показывает, что при регуляторе температуры с передаточной функцией (4) в одноконтурной системе с $a_{РТ}$=2 и $T_{ГК}$=3$T_{ДТ}$, обеспечивается стандартная реакция контура регулирования относительно выходного сигнала отрицательной обратной связи (σ=4,3 %).

На рис. 6 представлены кривые переходных процессов изменения температуры греющей камеры в трех независимых зонах обогрева печи, полученные на имитационной модели замкнутой системы управления температурой печи, реализованной с помощью математической программы MATLAB и её пакета анализа динамических систем SIMULINK. В этой системе контур регулирования температуры настроен на модульный оптимум.

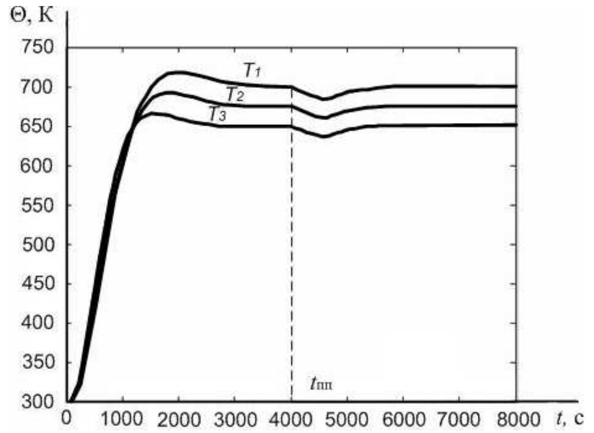


Рис. 6. *Переходные процессы изменения температуры греющей камеры БВП: T_1, T_2, T_3 – постоянные времени в греющих камерах 1, 2, 3; $t_{пп}$ – время переходного процесса*

Как видно из результатов моделирования при выбранных параметрах настройки регулятора температуры система автоматического регулирования

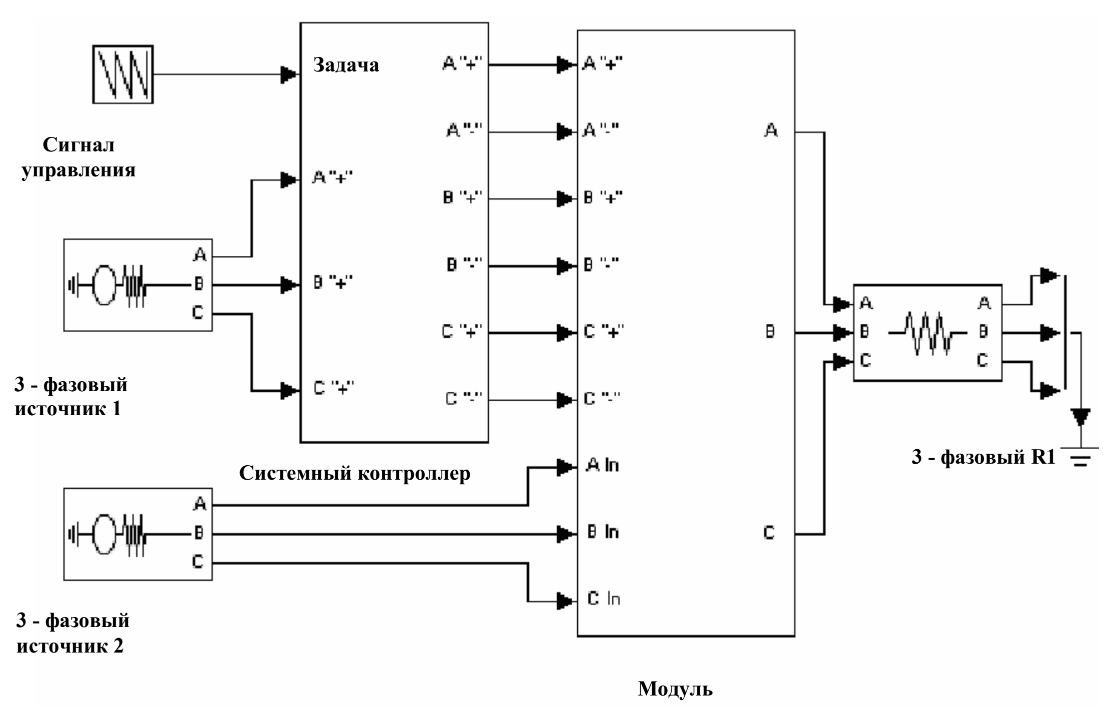


Рис. 7. *Имитационная модель симисторной станции с управлением по числу полупериодов*

обеспечивает непрерывное управление мощностью нагрева и отрабатывает возмущающее воздействие. Однако кривые переходных процессов изменения температуры греющей камеры печи в трех зонах нагрева характеризуется достаточно большим перерегулированием. Для того, чтобы снизить перерегулирование температуры греющей камеры печи до стандартного значения и получить переходный процесс изменения температуры с наименьшей степенью перерегулирования, необходимо установить на вход системы регулирования корректирующее устройство, передаточная функция которого равна в нашем случае апериодической составляющей обратной связи $1/(T_{ДП}p+1)$.

Имитационная модель с управлением по числу полупериодов. На рис. 7 представлена имитационная модель симисторной станции с управлением по числу полупериодов для автоматического регулирования температуры греющей камеры печи.

Данная модель состоит из основных блоков:

- блок «Сигнал управления» – устройство задания сигнала управления;
- блоки «3-фазовый источник 1», «3-фазовый источник 2» – трехфазные источники питания с номинальными промышленными параметрами;
- субблок «Системный контроллер» представляет собой три блока, в каждом из которых собрана схема, с помощью которой вырабатывается трехфазный сигнал системой управления с частотой, в 20 раз меньшей частоты сети для формирования пачек импульсов по 10 полуволн.

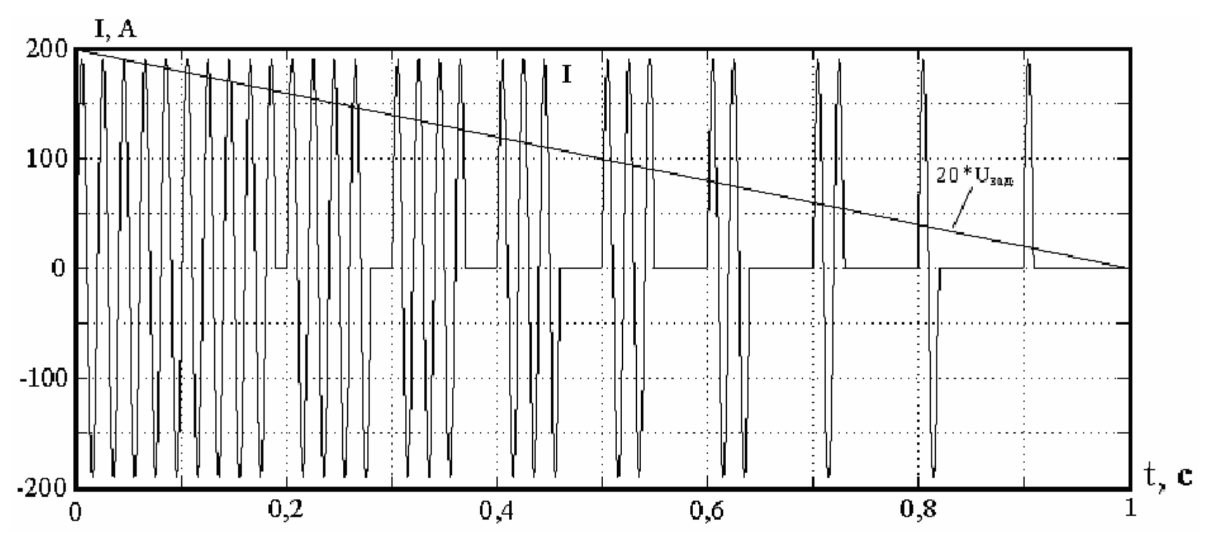


Рис. 8. *Диаграмма зависимости тока от сигнала задания*

- субблок «Модуль» – блок силовых симисторов, включенных по схеме, представленной на рис. 2;
- блок «3-фазовый R1» – трехфазный нагревательный элемент (соединение – «звезда» с нулем), представляющий собой активную нагрузку.

На рис. 8 представлена диаграмма тока на НЭ в соответствии с сигналом задания, полученная на имитационной модели.

Из приведенной диаграммы видно, что при снижении уровня сигнала задания происходит уменьшение числа пропускаемых полупериодов. Кроме того, коммутация симисторов при данном методе управления происходит в момент времени, когда ток в НЭ незначителен или равен нулю. Это исключает режим ударного приложения напряжения к НЭ во время коммутации симисторов, что увеличивает их срок службы, повышает работоспособность и надежность системы автоматического регулирования температуры греющей камеры БВП.

Вышесказанное еще раз подтверждает, что при работе СУ на мощную активную нагрузку целесообразно использовать не фазовый метод управления симисторами, а метод управления по числу полупериодов.

4. Заключение

Применение симисторных станций управления вместо контакторов для регулирования тока через нагревательные элементы греющей камеры барабанной вращающей печи при получении оксидов урана позволяет:

- использовать в системе автоматического управления температурным режимом греющей камеры промышленный регулятор, при помощи которого удается оптимизировать процесс получения оксидов урана;
- применять управление силовыми симисторами по числу полупериодов, что исключает режим ударного приложения напряжения к нагревательным элементам при коммутации и увеличивает срок службы оборудования, повышает работоспособность, надежность, межремонтный период эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брендаков В.Н., Дементьев Ю. Н., Кладиев С.Н., Пищулин В.П. Технология и оборудование производства оксидов урана // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 95–98.
2. Пищулин В.П., Брендаков В.Н. Математическая модель процесса термического разложения в барабанной вращающейся печи // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С. 106–109.
3. Пищулин В.П., Брендаков В.Н. Энергосберегающая технология получения оксидов урана // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. 10 Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 248–251.
4. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Контроль и защита источников питания. – М.: Altex, 2002. – Кн. 4. – 176 с.
5. Кладиев С.Н., Пищулин В.П., Дементьев Ю.Н. Тиристорная станция управления электрическим нагревом барабанной вращающейся печи // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. 10 Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 245–248.
6. Мезенин С.М., Сарапулов Ф.Н., Иванушкин В.А. Динамическая модель электропечи сопротивления // Автоматизация и прогрессивные технологии: Тез. докл. IV межотраслевой научно-техн. конф. – Новоуральск: НГТИ, 2005. – С. 25–28.

Поступила 12.04.2006 г.